

# 考虑累积损伤的坞式船闸裂缝扩展及 钢筋锚固改进研究

邓绪<sup>1</sup>, 曹周红<sup>1,2</sup>, 李芃芃<sup>1</sup>, 张昭伟<sup>1</sup>

(1. 长沙理工大学 水利工程学院, 湖南 长沙 410114; 2. 水沙科学与水灾害防治湖南省重点实验室, 湖南 长沙 410114)

**摘要:** 坞式船闸受力复杂, 河侧闸墙倒角附近易开裂, 钢筋锚固长度设计为现行水工行业规范最小值时, 裂缝扩展路径可能绕过锚固延长段, 甚至引发倒塌事故。采用扩展有限元方法(XFEM)建立仿真模型, 研究考虑累积损伤下的坞式船闸裂缝扩展规律, 并对钢筋锚固提出改进措施。结果表明: 考虑累积损伤的钢筋混凝土闸室裂缝扩展路径, 均在相同荷载作用下素混凝土状态闸室的拉应力区内部或附近; 倒角附近钢筋锚固长度取规范最小长度时, 部分损伤情形中荷载作用下裂缝扩展路径会绕过闸室倒角附近钢筋锚固延长段, 导致结构极限承载能力无法满足要求; 将钢筋锚固段延长, 使穿出素混凝土状态闸室拉应力区的钢筋长度等于规范最小锚固长度, 可使锚固延长段穿过裂缝扩展路径, 并减小裂缝扩展长度和钢筋最大拉应力, 使结构满足极限承载能力要求。研究结果可为船闸工程事故防治和相关设计规范进一步修订提供依据。

**关键词:** 水工结构; 累积损伤; 裂缝扩展; 扩展有限元方法(XFEM); 坞式船闸; 钢筋锚固; 倒角

中图分类号: TV332

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2021)03-0179-08

## Crack extension of dock-typed navigation-locks and improvement of reinforcing bar anchorages considering cumulative damages

DENG Xu<sup>1</sup>, CAO Zhouhong<sup>1,2</sup>, LI Pengpeng<sup>1</sup>, ZHANG Zhaowei<sup>1</sup>

(1. School of Hydraulic Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China;

2. Key Laboratory of Water - Sediment Sciences and Water Disaster Prevention of Hunan Province, Changsha 410114, China)

**Abstract:** The structure of dock-typed navigation-locks is under complex loads and is prone to cracks near the chamfering of the riverside lock wall. When the anchorage length of reinforcing bars is designed to be the minimum value according to the current hydraulic industry code, the crack propagation path may bypass the anchorage extension sections and even cause collapse accidents. Here, a simulation model of the navigation-lock structure was established using the extended finite element model (XFEM) to study the cracking law of dock-typed navigation-locks with the consideration of cumulative damages, and the improvement measures for the anchoring of reinforcing bars were put forward. The results show that considering cumulative damages, the crack propagation paths of the reinforced concrete lock chambers are all in or near the tensile stress area of the plain concrete lock chamber under the same loads. When the anchorage lengths of the reinforcing bars near the chamfering are designed to be the minimum value of the code, the crack propagation paths in some damage situations under the loads would bypass the anchorage extension sections of reinforcing bars near the chamfering of the lock chamber, resulting in the failure of meeting the requirements of the ultimate bearing capacity of the structure. When the lengths of the anchorage extension sections of reinforcing bars are stretched beyond the tensile stress area of the plain concrete lock chamber, and the exceeding parts are equal to the minimum value of the code, the anchorage extension sections can be made to pass through the crack propagation path, and the crack extension

收稿日期: 2020-11-26; 修回日期: 2021-04-03

基金项目: 国家自然科学基金项目(51309037); 湖南省重点实验室开放基金项目(2018DT04); 湖南省水利厅科技项目(20CSLG026)

作者简介: 邓绪(1997-), 男, 安徽阜阳人, 硕士研究生, 主要从事港口航道结构仿真分析研究。

通讯作者: 曹周红(1978-), 男, 湖南郴州人, 博士, 副教授, 硕士生导师, 主要从事港口航道结构仿真分析研究。

length and the maximum tensile stress of the reinforcing bars can be reduced to meet the requirements of the ultimate bearing capacity. The study results can provide a basis for the accident prevention and control of the navigation-lock structure, and for the further revisions of relevant design codes.

**Key words:** hydraulic structure; cumulative damage; crack propagation; extended finite element model (XFEM); dock-typed navigation-lock; reinforcing bar anchoring; chamfering

## 1 研究背景

坞式船闸是一种由底板与闸墙组成的大体积混凝土结构,常用于水头差较大的情况,承受水压力、土压力及地基反力等荷载产生的弯、拉、压、剪等作用。建造时常先浇筑完底板再浇筑闸墙<sup>[1]</sup>,并且设计时亦将底板与闸墙分别按弹性地基梁与悬臂梁进行计算<sup>[2]</sup>。为保证结构整体性,规定倒角钢筋需锚固入底板和闸墙,设计时常采用《水工混凝土结构设计规范(SL 191—2008)》(下称规范)中给出的方法确定最小锚固长度。然而,大量工程监测结果表明,经过多年运行后,坞式结构易产生累积损伤,并在倒角处出现肉眼可见的裂缝<sup>[3-5]</sup>,甚至引发突然倒塌事故。图1、2分别为某坞式船闸(下称事故船闸)的倒塌实况和相应结构段示意。

如图1、2所示,事故船闸在钢筋锚固长度设计为1.1倍规范最小长度的情况下,运行9年后在部分结构段闸底板内靠近河侧闸墙的位置出现不规则弧形贯穿裂缝,并且裂缝扩展路径绕过倒角附近钢筋锚固延长段,引起河侧闸墙发生倒塌事故,即使未倒塌的结构段也发现在河侧倒角下端点的位置出现纵向通长裂缝。目前该问题多见于相关现象的报道和描述,而鲜见有专门针对不同损伤下的坞式船闸钢筋混凝土结构裂缝扩展及钢筋锚固所起作用的深入分析与研究。

钢筋混凝土结构的开裂及破坏是一种高度非连

续、非线性力学问题,国内外学者进行了大量研究。Belytschko等<sup>[6]</sup>和Moës等<sup>[7]</sup>提出的扩展有限元方法(extended finite element model, XFEM)结合了断裂力学、水平集函数和单元分解等理论,能充分发挥传统有限元方法的优势,并且无需重新划分网格便可以研究结构断裂问题,计算效率高,因而近年来被广泛用于钢筋混凝土结构断裂研究。例如,杨涛等<sup>[8]</sup>模拟了钢筋混凝土简支梁加载过程中的裂缝扩展,林诗枫等<sup>[9]</sup>结合混凝土塑性损伤本构模型对混凝土斜拉桥索鞍进行了数值分析,何祥瑞等<sup>[10]</sup>建立了二维橡胶支座排架渡槽线弹性计算模型,Benvenuti等<sup>[11]</sup>建立规范化计算框架模拟了钢纤维补强钢筋混凝土梁的开裂过程,杨刚等<sup>[12]</sup>结合混凝土弹塑性本构关系模拟了钢筋混凝土柱的开裂过程。这些研究成果表明XFEM对钢筋混凝土断裂问题求解效果良好,应用前景广阔。

基于上述工程背景和研究现状,本文以事故船闸结构作为研究模型,采用XFEM进行建模和计算,首先对不同损伤情形下钢筋锚固长度设计为规范最小长度的坞式船闸结构的裂缝扩展及钢筋锚固作用进行研究,并与事故船闸原型观测结果和素混凝土闸室传统有限元计算结果进行对照。然后对钢筋锚固提出改进措施,并将改进前后不同情形下的XFEM计算结果进行对比,以提高结构极限承载能力,为船闸结构事故防治提供依据。



图1 事故船闸倒塌实况

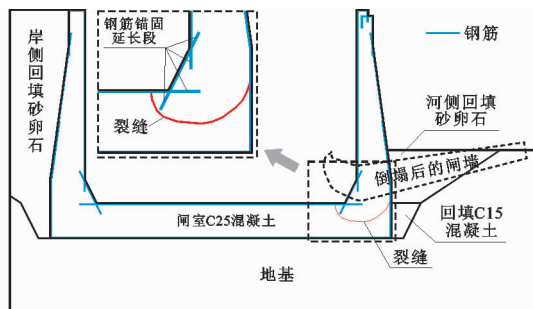


图2 倒塌结构段示意

## 2 计算原理

XFEM的基本计算原理是在求解域上做出单元分解函数,在子域上定义位移模式,并在裂缝面的邻

近区域进行特殊函数的富集<sup>[13]</sup>。图3为包含某一裂缝面的结构内部示意。在XFEM方法中将单元内任意高斯点 $x$ 的位移 $u_{xfem}^h$ 表示为<sup>[14]</sup>:

$$u_{xfem}^h(x) = u_{fe}(x) + u_{cr}(x) + u_{tip}(x) \quad (1)$$

式中:常规有限元位移  $u_{fe}$ 、两侧节点增强位移  $u_{cr}$  和裂缝尖端增强位移  $u_{tip}$  的表达式为:

$$\begin{cases} u_{cr}(x) = \sum_{i \in N_{cr}} N_i^*(x) H(x) \mathbf{a}_i \\ u_{tip}(x) = \sum_{i \in N_{tip}} N_i^*(x) \sum_{k=1}^4 F^k(r, \theta) \mathbf{b}_i^k \\ u_{fe}(x) = \sum_{i \in N} N_i(x) \mathbf{u}_i \end{cases} \quad (2)$$

式中:  $N$  为常规有限元节点数集合;  $N_{cr}$  为裂缝两侧增强节点数集合;  $N_{tip}$  为裂尖增强节点数集合;  $\mathbf{u}_i$  为常规单元节点自由度向量;  $\mathbf{a}_i$  为贯穿单元两侧节点自由度向量;  $\mathbf{b}_i^k$  为裂尖单元节点自由度向量,  $N_i$ 、 $N_i^*$  分别为常规节点和增强节点形函数,  $H(x)$  为贯穿单元增强函数在高斯点  $x$  的函数值,  $F^k$  为裂尖增强函数,  $(r, \theta)$  是高斯点  $x$  在图 3 所示裂尖极坐标系下的坐标:

$$r = \sqrt{(x - x_{tip})^2 + (y - y_{tip})^2} \quad (3)$$

$$\theta = \arctan\left(\frac{y - y_{tip}}{x - x_{tip}}\right) - \gamma \quad (4)$$

式中:  $(x, y)$  是高斯点的全局坐标;  $(x_{tip}, y_{tip})$  是裂缝尖端的全局坐标,  $\gamma$  是裂缝与全局坐标  $x$  轴的夹角  $\theta$ 。

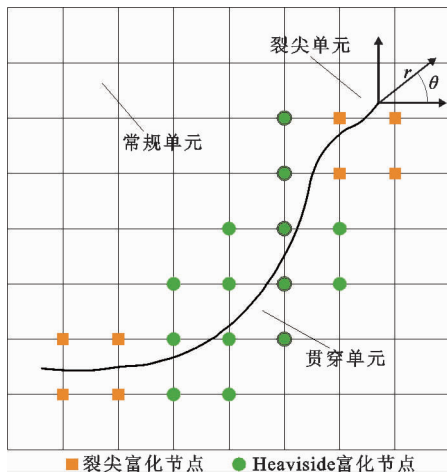


图 3 含有裂纹的网格

为消除富集后对模型收敛型和计算精度造成的影响,需要对增强函数进行如下调整<sup>[13]</sup>:

$$u_{xfem}^h(x) = \sum_{i \in N} N_i(x) \mathbf{u}_i + \sum_{i \in N_{cr}} N_i^*(x) [H(x) - H(x_i)] \mathbf{a}_i + \sum_{i \in N_{tip}} N_i^*(x) \sum_{k=1}^4 [F^k(r, \theta) - F^k(x_i)] \mathbf{b}_i^k \quad (5)$$

式中:  $x_i$  为单元上的节点。一般来说,裂缝完全贯穿单元增强函数选择 Heaviside 函数<sup>[7]</sup>,其常规形式如

下所示:

$$H(x) = \begin{cases} 1 & (x - x^*) \cdot \mathbf{n} \geq 0 \\ -1 & (x - x^*) \cdot \mathbf{n} < 0 \end{cases} \quad (6)$$

式中:  $x$  为所考察的点;  $x^*$  为离  $x$  最近的裂纹面上的点;  $\mathbf{n}$  为  $x^*$  处裂纹的单位外法向矢量。

对于二维各向同性材料线弹性断裂问题, Belytschko 等<sup>[6]</sup> 采用建立在裂缝尖端极坐标系下的 Westergaard 函数作为裂尖增强函数  $F^k$ :

$$F^k(r, \theta) = \begin{cases} \sqrt{r} \sin(\theta/2) & (k = 1) \\ \sqrt{r} \cos(\theta/2) & (k = 2) \\ \sqrt{r} \sin\theta \sin(\theta/2) & (k = 3) \\ \sqrt{r} \sin\theta \cos(\theta/2) & (k = 4) \end{cases} \quad (7)$$

对于 I、II 型复合加载状态,极坐标  $(r, \theta)$  下裂缝尖端应力场表示为<sup>[16]</sup>:

$$\begin{cases} \sigma_r = \frac{1}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \left[ K_I \left( 1 + \sin^2 \frac{\theta}{2} \right) + K_{II} \left( \frac{3}{2} \sin\theta - 2 \tan \frac{\theta}{2} \right) \right] \\ \sigma_\theta = \frac{1}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \left[ K_I \cos^2 \frac{\theta}{2} - \frac{3}{2} K_{II} \sin\theta \right] \\ \tau_{r\theta} = \frac{1}{2\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \left[ K_I \sin\theta + K_{II} (3 \cos\theta - 1) \right] \end{cases} \quad (8)$$

式中:  $\sigma_r$ 、 $\sigma_\theta$  为极坐标系下的正应力;  $\tau_{r\theta}$  为极坐标系下的剪应力;  $K_I$ 、 $K_{II}$  分别为 I、II 型应力强度因子。

裂缝的开裂根据混凝土材料的牵引 - 分离粘聚行为,采用最大主应力准则<sup>[15]</sup>。对于复合应力情况,通过最大环向应力准则判断裂缝的开裂方向,得到裂缝扩展角  $\theta_c$  为<sup>[16]</sup>:

$$\theta_c = \arccos \frac{3K_{II}^2 \pm \sqrt{K_I^4 + 8K_I^2 K_{II}^2}}{K_I^2 + 9K_{II}^2} \quad (9)$$

为模拟软化阶段裂缝面力学特征,采用线性的内聚力模型来描述该阶段裂缝演化。

根据 XFEM 的位移模式和虚功原理,推导出的控制方程如下<sup>[8]</sup>:

(1) XFEM 单元应变场

$$\begin{aligned} \boldsymbol{\varepsilon}(x) &= \mathbf{L} \cdot \mathbf{u}(x) \\ &= \mathbf{L} \cdot \mathbf{N}(x) \mathbf{q} + H(x) \mathbf{L} \cdot \mathbf{N}(x) \mathbf{a} \end{aligned} \quad (10)$$

式中:  $\boldsymbol{\varepsilon}(x)$  为应变矩阵;  $\mathbf{u}(x)$  为单元的位移向量;  $\mathbf{N}(x)$  为单元形函数矩阵;  $\mathbf{q}$  为连续节点位移向量;  $\mathbf{a}$  为节点自由度向量;  $H(x)$  为贯穿单元增强函数;  $\mathbf{L}$  为偏导数矩阵,表达式如下:

$$\mathbf{L} = \begin{bmatrix} \frac{\partial}{\partial x} & 0 & \frac{\partial}{\partial y} \\ 0 & \frac{\partial}{\partial y} & \frac{\partial}{\partial x} \end{bmatrix}^T \quad (11)$$

(2) 虚功方程

$$\begin{bmatrix} \int_{\Omega} \mathbf{B}^T \mathbf{D} \mathbf{B} d\Omega & \int_{\Omega} H(x) \mathbf{B}^T \mathbf{D} \mathbf{B} d\Omega \\ \int_{\Omega} H(x) \mathbf{B}^T \mathbf{D} \mathbf{B} d\Omega & \int_{\Omega} H(x) \mathbf{B}^T \mathbf{D} \mathbf{B} H(x) d\Omega + \int_{\Gamma_c} \mathbf{N}^T \mathbf{M}^T \mathbf{M} \mathbf{N} d\Gamma \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \mathbf{q}^* \\ \mathbf{a}^* \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \int_{\Gamma_{\sigma}} \mathbf{N}^T \mathbf{t}^* d\Gamma \\ 0 \end{Bmatrix} \quad (12)$$

式中：矩阵  $\mathbf{B}$  等于公式(10) 中的  $\mathbf{L} \cdot \mathbf{N}(\mathbf{x})$ ； $\mathbf{D}$  为单元的弹性矩阵； $\mathbf{M}$  为整体和局部坐标系的转换矩阵； $\Omega$  为计算域； $\Gamma_c$  为裂缝区域； $\Gamma_{\sigma}$  为二维裂纹的贯穿区； $\mathbf{t}^*$  为面积力向量的增量； $\mathbf{q}^*$  为连续节点位移向量的增量； $\mathbf{a}^*$  为节点自由度向量的增量。

### 3 模型建立

由于事故船闸为典型坞式结构船闸，且设计严格参照规范要求，故基于该结构建立仿真模型。模型配筋同原设计，锚固长度为采用规范中材料强度等级查表所确定的最小锚固长度。图4 为该船闸结构尺寸、水位、回填及配筋示意。

本文基于 XFEM 和平面应变模型，利用 ABAQUS 软件对该结构进行数值模拟。模型中混凝土和钢筋采用线弹性本构模型，对闸室 C25 混凝土额外定义牵引-分离粘聚行为以模拟其开裂过程，钢筋和混凝土之间采用非线性弹簧单元模拟粘结滑移作用<sup>[17]</sup>，地基和回填砂卵石采用摩尔-库伦本构

模型。

表1 为各材料的力学指标和单元类型<sup>[18]</sup>。混凝土和回填砂卵石受到的水压力和扬压力根据图4 所示水位进行加荷，回填土压力通过对回填砂卵石与混凝土之间建立接触单元来模拟，法向行为采用硬接触，切向行为采用摩擦接触，摩擦系数取 0.6，对于水下部分的土体需施加浮托力。

本文主要考察船闸混凝土的裂缝扩展路径和开裂后的闸室结构极限承载能力是否满足要求，即钢筋受到的最大拉应力不超过钢材的屈服强度。因此，若模型计算结果中最终状态下钢筋最大拉应力超过钢材屈服强度，则认为结构极限承载能力不满足要求。

此外，引入事故船闸未倒塌结构段的原型观测结果和相同荷载作用下素混凝土闸室的传统有限元计算结果作为参照，图5、6 分别为未倒塌结构段开裂原型观测结果和相同荷载作用下素混凝土状态闸室应力云图。

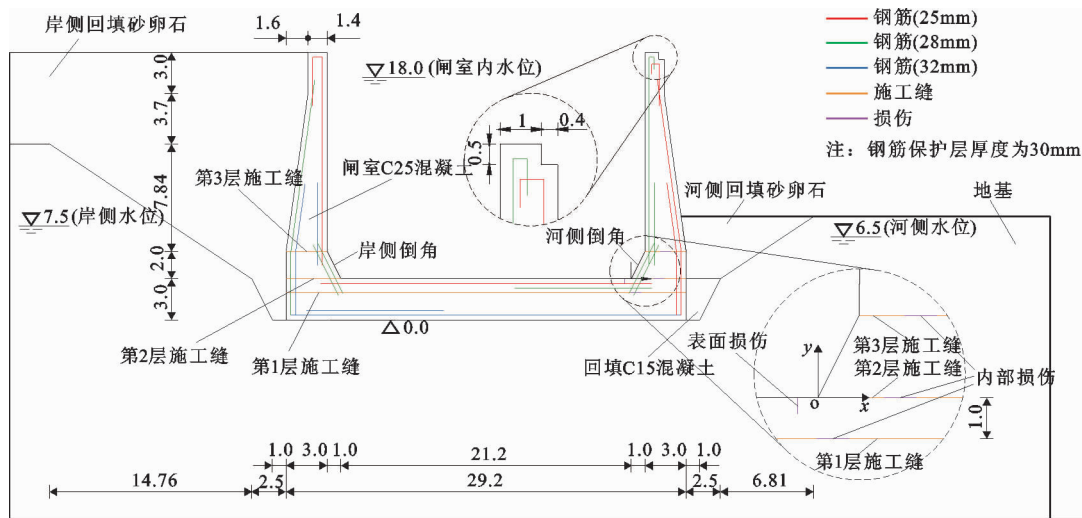


图4 典型坞式船闸结构及配筋示意(单位:m)

表1 材料力学参数

材料	密度/ (kg · m <sup>-3</sup> )	弹性模量/ GPa	泊松比	粘聚力/ Pa	内摩 擦角/(°)	抗拉(屈服) 强度/MPa	断裂能/ (N · m <sup>-1</sup> )	单元 类型
混凝土	C25	2400	0.167			1.78	57	C2D4R
	C15	2400	0.167					C2D4R
钢筋	7850	210	0.37			235		T3D2
砂卵石	1600	0.0098	0.3	0	35			C2D4R
地基		1.5	0.3	200	28			C2D4R

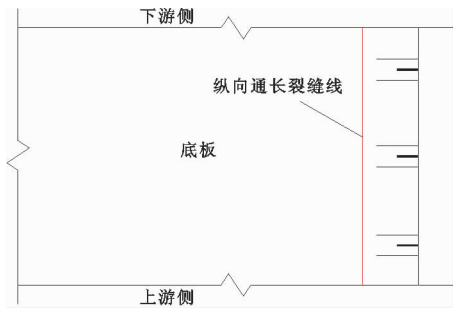


图 5 未倒塌结构段原型观测结果

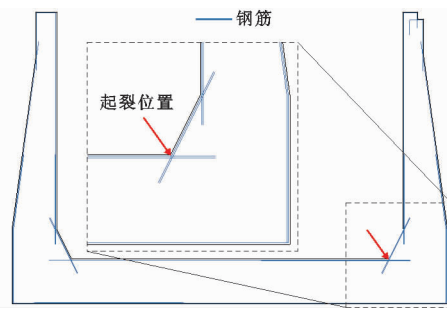


图 7 理想假定情况裂缝扩展和钢筋应力(规范方法)

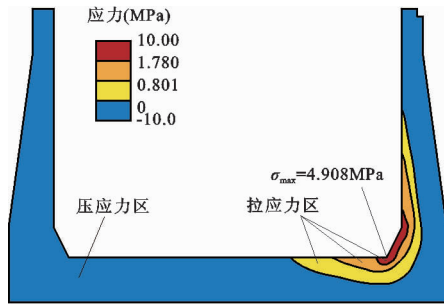
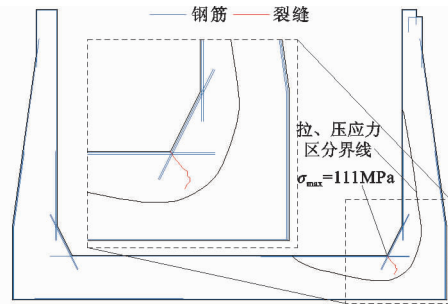


图 6 素混凝土状态闸室应力分布



#### 4 理想假定情况裂缝扩展研究及验证

不考虑混凝土因温度应力等产生微小裂缝等不利影响,亦不考虑混凝土分层浇筑导致层面粘结强度降低等不利影响,假定整个闸室结构为连续、均匀的理想弹性体,且各表面处按规范计算配置钢筋,倒角处锚固长度采用规范最小锚固长度,计算和分析其极限承载能力。图 7 为理想假定情况下闸室混凝土裂缝扩展路径和钢筋最大拉应力。

由图 7 可看出,在荷载作用下,裂缝会从河侧倒角下端点位置向下开裂,并且由于钢筋能够承担一部分裂缝扩展过程中尖端产生的拉应力,裂缝扩展长度为 1.56 m,不会贯穿闸底板,此时钢筋最大拉应力为 111 MPa,未超过钢材屈服强度。如图 5 所示,在事故船闸未倒塌结构段的原型观测结果中,发现有延闸墙倒角下端点向下开裂的纵向通长裂缝,与 XFEM 数值模拟的开裂位置相吻合。同时,由图 6 可看出,该起裂位置亦是相同荷载作用下素混凝土状态闸室传统有限元计算结果中结构受到拉应力最大的位置,并且裂缝扩展路径也位于拉应力较大区域。因此,本文采用的数值计算方法和建立的仿真模型是合理的,并且理想假定情况下裂缝扩展不会引起闸室倒塌破坏,满足极限承载能力要求。

#### 5 考虑累积损伤的裂缝扩展研究

##### 5.1 损伤情形设置

实际上,闸室结构并非连续、均匀的理想弹性

体,会产生各种损伤。例如,船闸大体积混凝土施工过程中,容易受到温度应力等因素的影响产生表面裂缝等损伤<sup>[19]</sup>,在分层浇筑的水平施工缝上容易出现缺陷<sup>[20, 21]</sup>。这些损伤在经过船闸多年运行之后,逐渐累积扩大,甚至在检修时肉眼可见,无需专门仪器检测,对结构极限承载能力造成极大影响。

尽管这些损伤的产生原因和发展机理十分复杂,但可按位置进行简单归类,即归类为表面损伤和内部损伤两类,下面分析其对结构极限承载能力的影响。考虑到这些损伤产生的位置对极限承载能力造成影响可能不同,故对多种位置假定的情形进行计算。表 2 为各计算情形的设置(具体位置和坐标系可参见图 4),模型其余参数如钢筋配置和外荷载等同第 4 节,图 8 为各情形裂缝扩展长度和钢筋最大拉应力,图 9 为各情形裂缝扩展路径示意。

##### 5.2 表面损伤情形裂缝扩展分析

如图 8、9 所示,情形 1 裂缝扩展路径主要分布在素混凝土状态闸室拉应力区内部,未绕过倒角附近钢筋锚固延长段,此时斜向钢筋可以发挥抗拉作用,使裂缝扩展长度较短,钢筋最大拉应力未超过钢材屈服强度。情形 2、3 和 4 初始阶段裂缝扩展路径在拉应力区域内部,随后绕过倒角附近钢筋锚固延长段,并沿拉压应力区分界线外围扩展,此时该延长段钢筋无法发挥抗拉作用,仅有水平钢筋发挥作用,使裂缝向河侧扩展到了闸墙边缘,导致钢筋的最大拉应力超过了钢材的抗拉屈服强度。

表2 损伤情形及位置

损伤类型	情形编号	位置坐标/m		
		端点1	端点2	
表面损伤	1	(-0.5,0)	(-0.5,-0.2)	
	2	(-1.0,0)	(-1.0,-0.2)	
	3	(-1.5,0)	(-1.5,-0.2)	
	4	(-2.0,0)	(-2.0,-0.2)	
内部损伤 (施工缝)	第1层	5	(-1.0,-1)	(-0.5,-1)
		6	(-0.5,-1)	(0,-1)
		7	(0,-1)	(0.5,-1)
	第2层	8	(0.5,-1)	(1.0,-1)
		9	(1.0,-1)	(1.5,-1)
		10	(0,0)	(0.5,0)
	第3层	11	(0.5,0)	(1.0,0)
		12	(1.0,0)	(1.5,0)
		13	(1.5,0)	(2.0,0)
14		(0.5,2)	(1.0,2)	
	15	(1.0,2)	(1.5,2)	
	16	(1.5,2)	(2.0,2)	

因此,表面损伤情形的裂缝扩展路径初始阶段均分布在素混凝土状态闸室拉应力区内部,若采用规范方法设计的钢筋锚固长度,部分情形随后的裂缝扩展路径会绕过河侧闸墙倒角附近钢筋锚固延长段的端点,导致结构极限承载能力无法满足要求。

### 5.3 内部损伤情形裂缝扩展分析

由图8、9可看出,情形5~8、10~12、14和15中闸室混凝土会从初始损伤的尖端向两端开裂,并且左端的扩展会延伸到闸室内侧,情形5、7和8右端的扩展接近甚至贯穿到闸墙外侧。而对于情形9、13和16,由于初始损伤远离拉应力区域较大的位置,因而混凝土未从初始损伤两端开裂,而是从河侧

倒角的下部端点开裂,其中情形9中的裂缝扩展到了内部损伤的位置,随后不再开裂。这些情形的裂缝扩展路径均分布在素混凝土状态闸室拉应力区或拉压应力区分界线的周围。

闸底板内水平施工缝上的内部损伤的裂缝扩展长度大多较长,部分情形的钢筋最大拉应力接近甚至超过钢材本身的抗拉强度。对于易发生裂隙渗流<sup>[22]</sup>和水力劈裂<sup>[23]</sup>的水工结构而言,由于倒角附近的钢筋锚固延长段没有穿过裂缝扩展路径而无法发挥其抗拉作用,因此这些情形下的裂缝扩展会对坞式船闸结构的极限承载能力产生较大的影响。河侧倒角上部 and 下部施工缝上的损伤裂缝扩展长度较小,且各种情形中钢筋最大拉应力均小于钢材的抗拉屈服强度,对船闸结构的极限承载力产生的影响较小。

## 6 钢筋锚固改进研究

### 6.1 锚固改进措施研究

第5节的计算结果表明,按现行水工行业规范设计钢筋锚固长度的情况下,考虑损伤情形下的裂缝扩展路径易绕过钢筋在闸底板和闸墙内的锚固延长段的端点,难以充分发挥倒角附近所有钢筋的抗拉作用,导致裂缝扩展长度过长,甚至贯穿闸底板或闸墙,无法保证船闸结构的极限承载能力,但这些裂缝的扩展路径均分布在素混凝土状态闸室的拉应力区或拉压应力区分界线的周围,不会离拉应力区域过远。

根据裂缝扩展路径的分布特点,为充分发挥设计在河侧倒角附近的水平、竖向和斜向钢筋的抗拉作用,本节将倒角附近钢筋的锚固段延长,使穿出素混凝土状态闸室拉应力区的钢筋长度等于规范最小锚固长度,研究该改进措施下的裂缝扩展和结构极限承载能力,改进后的裂缝扩展和钢筋应力计算结果见图8、9。图10为改进后的倒角附近设计钢筋锚固延长示意。

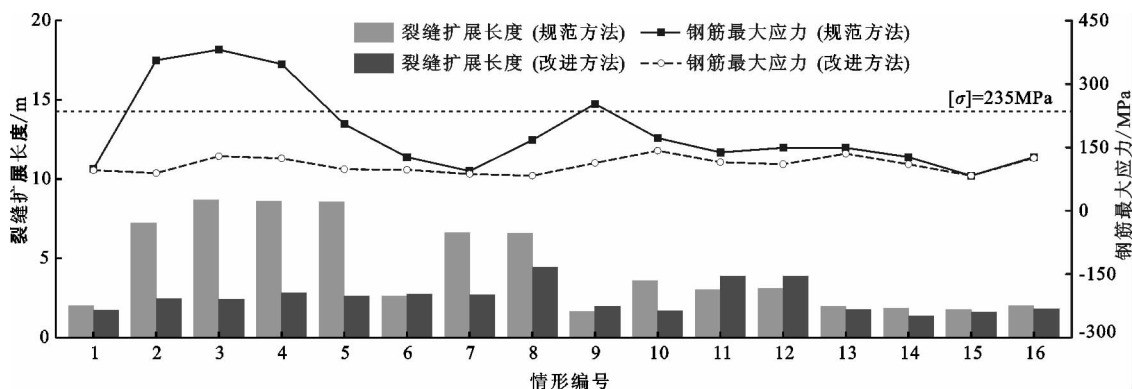


图8 改进前后裂缝扩展长度及钢筋应力

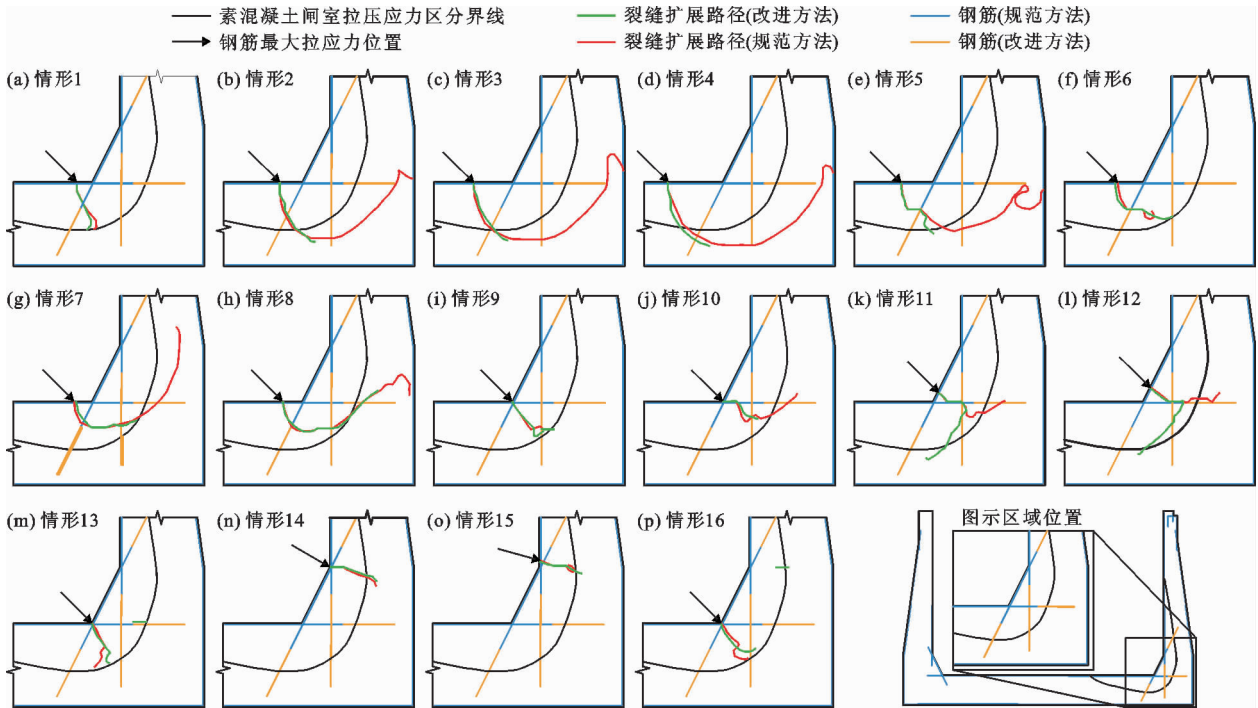


图 9 改进前后裂缝扩展路径

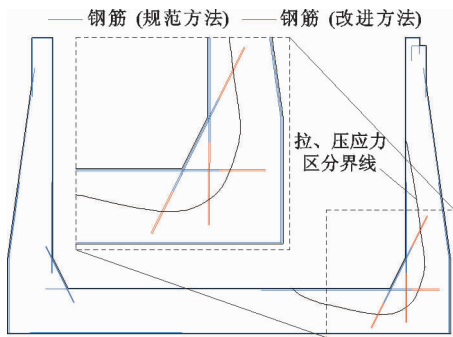


图 10 倒角附近设计钢筋锚固延长示意

### 6.2 改进后损伤情形分析

(1) 表面损伤情形。如图 8.9 所示,由于改进后的斜向钢筋在闸底板内的锚固延长段能够穿过裂缝的扩展路径,进而发挥其抗拉作用,分担部分水平钢筋的拉力,使情形 1~4 中裂缝扩展长度分别减少 14.8%、66.3%、72.1% 和 67.2%,均未接近或贯穿到闸底板或闸墙外侧,钢筋最大拉应力则分别减少 3.03%、75.0%、66.1% 和 64.3%,均远小于钢材的抗拉屈服强度。因此,改进锚固长度使表面损伤情况下裂缝扩展后的船闸结构极限承载能力满足要求。

(2) 内部损伤情形。由图 8.9 可看出,对于第 1 层水平施工缝上的累积损伤,改进后的情形 5、7 和 8 中裂缝扩展长度分别减少了 69.3%、59.0% 和 32.3%,相应的钢筋受到的最大拉应力分别减少了 42.8%、7.4% 和 50.3%,情形 6 和 9 中虽扩展长度

变化不大,但钢筋受到的最大拉应力分别减少了 23.6% 和 54.5%。对于第 2 层水平施工缝上的累积损伤,改进后的情形 10 中裂缝扩展长度减小了 52.7%。情形 11 和 12 中裂缝左端的扩展变化不大,右端扩展趋势由向河侧扩展转变为了向闸底板底部扩展。情形 13 中闸室混凝土仍未从内部损伤两端扩展,而是从倒角下端点位置开裂,故裂缝扩展长度变化不大。情形 10~13 中竖向和水平钢筋的锚固延长段均能够穿过裂缝扩展路径,进而发挥抗拉作用,使裂缝扩展后的钢筋最大拉应力减小了 9%~27%。对于第 3 层水平施工缝上的累积损伤,各情形的裂缝扩展长度稍有减小,开裂后钢筋最大拉应力变化不大,因此延长倒角钢筋的锚固长度对该水平施工缝损伤情况下的裂缝扩展影响较小。

以上计算结果可以看出,改进后的船闸结构中钢筋最大拉应力均远小于钢材的抗拉屈服强度,满足极限承载能力要求。

## 7 结 论

本文建立了基于 XFEM 的坞式船闸结构仿真模型,并利用该模型研究了其考虑损伤情形下的裂缝扩展规律和对结构承载力的影响,得出如下结论:

(1) 对于承受水头较高的坞式船闸,即使在不考虑损伤的理想假定情况下,钢筋混凝土闸室也会从倒角下端点开裂,开裂位置与原型观测结果相符,

说明本文选用的数值计算方法和建立的仿真模型合理可行;

(2)考虑累积损伤下的钢筋混凝土闸室裂缝扩展路径,均在相同荷载作用下素混凝土状态闸室拉应力区内部或附近,不会离拉应力区过远;

(3)倒角附近钢筋的锚固长度取规范最小锚固长度时,部分损伤情形中荷载作用下的裂缝扩展路径会绕过闸室倒角附近钢筋锚固延长段,导致结构极限承载能力无法满足要求;

(4)将钢筋锚固段延长,使穿出素混凝土状态闸室拉应力区的钢筋长度等于规范最小锚固长度,可使锚固延长段穿过裂缝扩展路径,以有效抑制船闸结构裂缝扩展趋势,并减小钢筋最大拉应力,使结构满足极限承载能力要求。

#### 参考文献:

- [1] 曹周红, 练继建, 刘晓平. 坞式结构有限元仿真模拟及施工过程对底板受力影响分析[J]. 工程设计学报, 2013, 20(4):326-331.
- [2] 曹周红. 船闸结构时变演化的多场耦合静动力分析与研究[D]. 天津:天津大学, 2013.
- [3] 孙林松, 陈兆文. 某船闸闸室结构裂缝成因及加固效果分析[J]. 河海大学学报, 1998, 26(6):106-109.
- [4] 张倩. 邵伯三线船闸闸室墙倒角裂缝原因分析及防治[J]. 水运工程, 2011(4):136-139.
- [5] 朱平, 王海滨, 刘宏新. 船闸工程闸室侧墙裂缝分析与处理[J]. 水运工程, 2006(8):116-119.
- [6] BELYTSCHKO T, BLACK T. Elastic crack growth in finite elements with minimal remeshing[J]. International Journal for Numerical Methods in Engineering, 1999, 45(5):601-620.
- [7] MOËS N, DOLBOW J, BELYTSCHKO T. A finite element method for crack growth without remeshing[J]. International Journal for Numerical Methods in Engineering, 1999, 46(1):131-150.
- [8] 杨涛, 邹道勤. 基于XFEM的钢筋混凝土梁开裂数值模拟[J]. 浙江大学学报(工学版), 2013, 47(3):495-501.
- [9] 林诗枫, 黄侨, 胡雪峰, 等. 基于扩展有限元法的部分斜拉桥索鞍抗裂性分析[J]. 桥梁建设, 2015, 45(1):68-73.
- [10] 何祥瑞, 张华, 纪爱丽. 基于XFEM的渡槽单向地震动作用下裂纹开展分析[J]. 水资源与水工程学报, 2016, 27(1):186-189+194.
- [11] BENVENUTI E, ORLANDO N. Failure of FRP-strengthened SFRC beams through an effective mechanism-based regularized XFEM framework[J]. Composite Structures, 2017, 172:345-358.
- [12] 杨刚, 许斌, 陈洪兵. 钢筋混凝土柱破坏过程扩展有限元数值模拟[J]. 应用力学学报, 2018, 35(3):602-608+693.
- [13] 刘京. 基于扩展有限元的页岩水平井压裂裂缝扩展规律研究[D]. 西安:西安石油大学, 2019.
- [14] MELENK J M, BABUŠKA I. The partition of unity finite element method: Basic theory and applications[J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 1996, 139(1-4):289-314.
- [15] 张华, 郑凯, 王雷. 混凝土直切槽平台巴西圆盘冲击劈裂拉伸断裂特性试验和数值模拟研究[J]. 振动与冲击, 2019, 38(17):149-155+204.
- [16] 石杰, 李庆斌. 基于扩展有限元重力坝尺寸效应[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2017, 57(4):345-350.
- [17] 刘硕, 汪基伟, 冷飞. 适用于扩展有限元裂缝计算的钢筋与混凝土粘结滑移关系[J]. 水利水电技术, 2017, 48(1):77-81.
- [18] 王青, 卫军, 刘晓春, 等. 钢筋混凝土梁疲劳累积损伤过程的等效静力分析方法[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2016, 47(1):247-253.
- [19] 曹周红, 刘晓平, 卢海斌, 等. 温度应力对坞式船闸底板开裂影响分析[J]. 水运工程, 2006(5):70-73.
- [20] 王兵. 雨雪天气下浇筑混凝土对其质量影响作用研究[J]. 混凝土, 2014(2):153-155.
- [21] 苏超, 李顺顺, 杨旸, 等. 坞式闸室混凝土裂缝控制措施[J]. 水运工程, 2019(10):124-129.
- [22] 张国新, 周立本, 朱伯芳, 等. 五强溪船闸裂缝的流形元模拟[J]. 水利学报, 2003, 34(11):37-42.
- [23] 甘磊, 龙一飞, 沈振中, 等. 水工混凝土结构水力劈裂研究综述[J]. 混凝土, 2019(1):43-46.